基于特定时间调查数据组建的白蜡窄吉丁种群生命表

路纪芳[1,3]，王智勇[2]，杨忠岐[3,*]，魏　可[3]，
杨远亮[4]，王　健[1]，司徒春南[1]，付甫永[1]
（1. 遵义市林业科学研究所，贵州遵义 563002；2. 乐山师范学院生命科学研究院，四川乐山 614004；
3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所，北京 100091；
4. 重庆市林业科学研究院，三峡库区森林生态保护与恢复重庆市市级重点实验室，重庆 400036）

摘要：为了探明影响白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* Fairmaire 自然种群变化的关键因子，本研究于 2010 – 2011 年采用当年秋季和翌年春季两个特定时间调查取样的方法，组建了天津、北京和辽宁 3 个地区白蜡窄吉丁的自然种群生命表。结果显示，这 3 个地区白蜡窄吉丁的自然种群数量在今后几年均将呈增长趋势，但不同地区的增长速率存在较大差异。北京地区白蜡窄吉丁的种群数量增长速率最快（种群趋势指数 $I = 12.9997$），其次是天津地区（$I = 12.4388$），这两个地区的寄主植物相同，均为绒毛白蜡。增长最慢的是辽宁地区（$I = 3.6394$），其寄主植物为水曲柳。另外，通过 3 个地区白蜡窄吉丁生命表和排除控制指数可以看出，天津地区白蜡窄吉丁最主要的致死因子是白蜡吉丁柄腹茧蜂 *Spathius agrili* Yang（种群数量排除控制指数 $EIPC = 1.5382$），对种群数量变动的贡献最大；北京地区的是啄木鸟（$EIPC = 1.4515$），而辽宁地区白蜡窄吉丁最主要的致死因子是白蜡吉丁卵跳小蜂 *Oobius agrili* Zhang *et* Huang 的寄生作用（$EIPC = 1.4701$）。这些研究结果表明，寄主植物的差异是影响白蜡窄吉丁自然种群数量变动的主要因素，同时寄生性天敌白蜡吉丁柄腹茧蜂对种群数量的影响作用也比较大。因此，实际应用中可以通过培育抗性树种和人工繁育优势天敌等方法对该虫进行有效防治。

关键词：白蜡窄吉丁；自然种群生命表；种群趋势指数；致死因子；寄生
中图分类号：S763.301　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：0454-6296(2013)11-1294-12

Life table of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae), based on special time survey data

LU Ji-Fang[1,3], WANG Zhi-Yong[2], YANG Zhong-Qi[3,*], WEI Ke[3], YANG Yuan-Liang[4], WANG Jian[1], SITU Chun-Nan[1], FU Fu-Yong[1] (1. Zunyi Institute of Forestry, Zunyi, Guizhou 563002, China; 2. College of Life Science, Leshan Normal University, Leshan, Sichuan 614004, China; 3. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. Chongqing Key Laboratory of Forest Ecology Protection and Restoration in the Three Gorges Area, Chongqing Academy of Forestry, Chongqing 400036, China)

Abstract: To ascertain the key factors influencing the natural population dynamics of the emerald ash borer (EAB), *Agrilus planipennis* Fairmaire, the natural population life tables of EAB populations in Tianjin, Beijing and Liaoning were constructed by specific time (autumn in 2000 and spring in 2011) sampling method. The results indicated that population density would increase in the three areas in the following years. The host plant of Beijing and Tianjin populations was *Fraxinus velutina*, but that of the Liaoning population was *F. mandshurica*. The population density of EAB had the fastest growth rate (index of population trend, $I = 12.9997$ and $I = 12.4388$, respectively) in Beijing and Tianjin, but had the slowest growth rate in Liaoning ($I = 3.6394$). The main lethal factors for EAB were *Spathius agrili* Yang (the exclusion index of population control, $EIPC = 1.5382$) and woodpecker ($EIPC = 1.4515$) in Tianjin and Beijing, respectively, but was *Oobius agrili* Zhang *et* Huang in Liaoning ($EIPC = 1.4701$). It is concluded that the difference of host plants is the major factor influencing natural population density of EAB, and the parasitoid *S. agrili* Yang also plays an important role in its population density.

基金项目：美国农业部动植物检疫局资助项目（USDA-APHIS）；重庆市基本科研业务费计划项目［2012（stc-jbky-0070）］
作者简介：路纪芳，女，1984 年生，河南禹州人，硕士研究生，研究方向为害虫生物防治，E-mail：senbaoljf20052186@126.com
* 通讯作者 Corresponding author, E-mail：yzhqi@caf.ac.cn
收稿日期 Received：2013-07-09；接受日期 Accepted：2013-09-30

Therefore, breeding resistant host species and artificially rearing dominant natural enemies will be effective methods to control the pest in practical application.

Key words: *Agrilus planipennis*; natural population life table; index of population trend; death factors; parasitization

白蜡窄吉丁 *Agrilus planipennis* Fairmaire 是危害木犀科(Oleaceae)白蜡属 *Fraxinus* 林木的重要蛀干害虫，又名花曲柳窄吉丁、梣小吉丁，属鞘翅目(Coleoptera)吉丁甲科(Buprestidae)，异名 *A. marcopoli* Obenberger(于诚铭，1992)。20 世纪 60 年代该虫曾在我国东北的美国白蜡 *Fraxinus americana* L. 和水曲柳 *Fraxinus mandshurica* 等植物上危害较重(中国科学院动物研究所，1986；于诚铭，1992)。近年来，白蜡窄吉丁在天津、北京、辽宁、吉林等地危害又趋于加重，已成为我国重要的检疫性蛀干害虫之一(赵汗青等，2006)。2002 年，该虫传入北美，并迅速传播，给当地经济造成巨大的损失(Haack *et al*., 2002；Baranchikov *et al*., 2008)。

目前，对白蜡窄吉丁的生态学和生物学特性已进行了大量的研究，基本弄清了该虫的年生活史和生态学习性。该虫在我国黑龙江以南地区均一年发生 1 代，以不同龄期的幼虫或蛹越冬(于诚铭，1992；Haack *et al*., 2002；Wang *et al*., 2010)。但对影响白蜡窄吉丁自然种群数量变动的因素尚不十分清楚。生命表是从 20 世纪 20 年代提出的人口增长模型发展起来的，它系统地记述了种群的死亡或生存率和生殖率，是研究种群数量变动机制和制定数量预测模型的一种重要方法(南京农学院，1985；张孝羲，2002；陈晓鸣等，2008)。自从 Morris 和 Miller 首次把生命表技术应用于昆虫自然种群以来，它就被广泛地用于解决农林害虫问题(You, 1997；陈晓鸣等，2008)。林木蛀干类害虫(如天牛、吉丁甲、小蠹虫、木蠹象、木蠹蛾、透翅蛾等)主要在树干木质部或树皮下活动，隐蔽性强(王小艺等，2008)，且生活周期较长，很难预测这类害虫的种群数量变动机制。特定时间生命表是在年龄组配稳定的前提下，以特定时间为单位间隔调查存活虫数或繁殖虫数，它可以获得种群在特定时间内的死亡率，预测未来种群数量的变动情况(张孝羲，2002)。采用该方法选择特定的时间砍伐受害木，可以得到蛀干害虫每个时期的死亡率。为了探明影响白蜡窄吉丁自然种群变化的关键因子，本研究在 2010－2011 年通过对天津、北京和辽宁 3 个地区白蜡窄吉丁各虫期种群数量动态和致死因素等的调查，组建 3 个地区白蜡窄吉丁的自然种群生命表，并分析了影响该虫种群数量变动的主要原因，结果可为 3 个地区白蜡窄吉丁发生情况的短期预测制定合理的综合防治方案提供依据。

1　材料和方法

1.1　样地概况

天津地区：位于天津市大港区官港森林公园内，38°56′ N，117°29′ E，平均海拔高度为 3 m，年平均气温为 14.19℃，年极端高温为 38.90℃，年极端低温为 －18.10℃，年降雨量为 447.27 mm。林地为绒毛白蜡 *Fraxinus velutina* 纯林，为沿海防护林的一部分。林地面积大约为 5 hm^2。

北京地区：北京市西山林场，40°00.571′N，116°11.226′E，平均海拔为 292.9 m，年平均气温为 14.69℃，年极端高温为 40.60℃，年极端低温为 －16.70℃，年降雨量为 650.00 mm。林地为绒毛白蜡混交林。

辽宁地区：辽宁省丹东市凤城市赛马镇南庙村，40°52.823′ N，124°16.419′ E，平均海拔为 488.20 m，年平均气温为 10.31℃，年极端高温为 30.80℃，年极端低温为 －19.30℃，年降雨量为 861.73 mm。林地为水曲柳次生混交林。

1.2　白蜡窄吉丁生命表调查

树冠顶梢枯死和树干基部出现徒长枝是白蜡窄吉丁危害的早期症状(Liu *et al*., 2003)。生命表数据从 2010 年开始调查，在天津、北京和辽宁 3 个地区分别选取 20 株受害白蜡树作为样木，并编号，用油漆在铁片上写好编号钉在树干 2.0 m 处。由于辽宁地区虫口密度较低，因此，在 2010 年 4 月份环割样树引诱成虫产卵，环割宽度为 10～20 cm。

白蜡窄吉丁以幼虫在树皮的韧皮部、形成层和木质部浅层蛀食危害，且整个生活史中幼虫期最长(Wang *et al*., 2010；路纪芳等，2012a)。Wang 等(2010)的研究结果表明白蜡窄吉丁幼虫体长、体宽和前胸背板宽度与取食坑道末端的宽度均存在线性关系，呈正相关。因此，在解剖木段时可以通过测

量幼虫取食坑道末端的宽度来确定幼虫的龄期。白蜡窄吉丁幼虫在树皮下的取食坑道呈“之”型，在受害不是特别严重的地区(3 个试验点的受害情况都不是特别严重)可以通过取食坑道寻找到每头幼虫或蛹，因此，采用特定取样时间解剖木段可以准确地追踪所有幼虫，确定每个龄期幼虫的数量和死亡原因。

每个试验点的 20 株样树分两次砍伐：幼虫钻入蛹室开始越冬和翌年成虫羽化前两个时间。每次砍伐 10 株样木，砍伐之前测量每株样树的胸径。把树干截成适当的长度(1.3 ~2.0 m)带回室内解剖，记录木段的长度和木段中部的直径。

白蜡窄吉丁的卵多产于树干老翘皮下面或纵裂缝内，不裸露，表面难以发现(Wang *et al*., 2010)。因此，解剖木段时收集每个木段的树皮，并分装在不同的塑料袋子中带回室内，在解剖镜下查找所有卵粒。记录每个木段上卵的总数量、孵化和死亡卵的数量，及每粒卵的死亡原因。

把截好的木段带回室内解剖，通过跟踪幼虫的取食坑道收集每头幼虫或蛹，用尺子测量并记录幼虫头壳及取食坑道末端的宽度。记录每个木段上幼虫或蛹的总数量、存活和死亡幼虫或蛹的数量，及其它们的死亡原因。

1.3 数据分析

白蜡窄吉丁成虫羽化前生活在树皮下，表面很难发现。因此，用两次特定取样时间的数据来分析各虫期的死亡率。用 i($i=1, 2, 3, \cdots, n$)表示白蜡窄吉丁的发育阶段，j($j=1, 2, \cdots, m$)表示死亡原因，D 和 L 分别表示每个死亡因素致死的个体数量和个体总数量，q_x 和 s_x 表示死亡率和存活率。某个发育阶段 x 的 L_x 表示为：

$$L_x = \sum_{i=1}^{x} L_i \quad (1)$$

发育阶段 x 的死亡百分率为：

$$100q_x = \frac{D_x}{L_x} \times 100 = \frac{D_x}{\sum_{i=1}^{x} L_i} \times 100 \quad (2)$$

则发育阶段 x 的存活率为：

$$s_x = 1 - q_x \quad (3)$$

种群趋势指数(index of population trend, I)是指在一定条件下，下一代或下一虫态的数量(N_{n+1})占上一代或上一虫态数量(N_n)的比值，也就是存活指数(南京农学院，1985；庞雄飞，2002)。1963 年，Morris 和 Watt 提出了 I 值模式(南京农学院，1985)，即 I 值可用世代内各虫期的存活率和繁殖力乘积来表示：

$$I = S_E \cdot S_{L1} \cdot S_{L2} \cdots S_P \cdot S_A \cdot P_♀ \cdot F \cdot P_F \quad (4)$$

式中：S_E, S_{L1}, $S_{L2} \cdots S_P$, S_A 分别表示卵、各龄幼虫、蛹、成虫的存活率；$P_♀$表示雌性比率；F 表示雌虫最高产卵量(生殖力)；P_F 指卵的实际产出率 = 实际生殖力/最高生殖力。其中，$I=1$，下代种群数量将保持不变；$I>1$，下代种群数量将增加；$I<1$，下代种群数量将减少。

庞雄飞(1990)提出生命表重要因素分析，即各致死因子对 I 值的作用。本研究用庞雄飞(2002)提出的种群数量排除控制指数(the exclusion index of population control, *EIPC*)来剖析各组分对 I 值的作用，即 *EIPC* 可表示为：

$$EIPC = \frac{I_E}{I} = \frac{S_1S_2S_3\cdots 1 \cdots S_kP_♀FP_F}{S_1S_2S_3\cdots S_x \cdots S_kP_♀FP_F} = \frac{1}{S_x} \quad (5)$$

根据 q_x 和 s_x 的数据，可假设一个由 2 000 粒卵组成的标准组，这些个体在整个生命过程中面临着被寄生、捕食等死亡因素。另外，由于钻入木质部越冬的个体仍处于幼虫状态，因此，分析时把越冬幼虫归到 3 -4 龄幼虫阶段。

2 结果与分析

2.1 白蜡窄吉丁各虫期死亡原因判别

在天津、北京和辽宁 3 个地区砍伐 60 株白蜡树，共采集到 1 620 粒卵和 1 065 头幼虫，得出各虫期的致死原因(表 1，图 1)。

2.2 白蜡窄吉丁自然种群生命表

根据白蜡窄吉丁的生物学特性，从卵期开始组建了天津、北京和辽宁 3 个地区的自然种群生命表(表 2 ~4)。从 3 个地区的生命表数据可以看出，辽宁地区的总死亡率(90.50%)明显高于天津(74.70%)和北京(73.56%)两个地区的死亡率，表明辽宁地区死亡因子的控制作用较好，能有效控制害虫的种群数量。

导致 3 个地区白蜡窄吉丁自然种群死亡率不同的主要因子不同。由于辽宁地区与北京和天津两个地区寄主植物的不同，导致辽宁地区寄主植物抗性致死的个体数量(173.37)明显大于北京(7.46)和天津(38.18)两个地区。另外，辽宁地区与北京和天津两个地区主要致死阶段和主要天敌的种类也存在较大的差异。天津和北京 2 个地区，3 -4 龄幼虫阶段的种群数量损失最大，阶段死亡率分别为

表 1　白蜡窄吉丁各虫期死亡症状和致死因子

Table 1　Death syndrome and lethal factors for all stages of *Agrilus planipennis*

发育阶段 Developmental stage	死亡症状 Death syndromes	致死因子 Lethal factors
卵 Egg	黄色，卵内空，只剩下半个卵壳，或卵壳边缘被咬破 Yellow, no yolk in the egg, some of eggs existed with only half eggshell, or the edge of the eggs were bitten by predator	捕食 Predation
	黑色或深褐色，卵壳饱满或正面有一小洞(图 1：A) Black or brown, plump egg, or a small hole on the surface of the eggshell (Fig. 1：A)	白蜡吉丁卵跳小蜂 *Oobius agrili* Zhang *et* Huang
	黄色，卵壳干瘪，两面均没有小洞 Yellow, shrivelled egg, no hole on both sides of the eggshell	未知 Unknown
1 – 2 龄幼虫 1st – 2nd instar larva	幼虫体表布满白色小幼虫或茧(图 1：B) The body of the EAB larva covered with larvae or pupae of parasitoid (Fig. 1：B)	白蜡吉丁柄腹茧蜂 *Spathius agrili* Yang
	虫道末端布满白色小幼虫，且两端可见寄主幼虫头壳和尾叉(图 1：C) The end of gallery filled with parasitoid larvae, host head capsule and caudal furca left in the gallery (Fig. 1：C)	白蜡吉丁啮小蜂 *Tetrastichus planipennisi* Yang
	幼虫虫体为黑色，腐烂，或虫体僵硬，体表布满白色短毛 Black body, decayed, or the larvae stiffness, the host surface covered with hypha	病原微生物 Pathogenic microorganisms
	虫道末端未见幼虫，有植物的增生组织(图 1：D) No EAB larvae in the gallery, plant hyperplasia tissue practically filled the gallery (Fig. 1：D)	植物抗性 Plant resistance
	虫道末端未见幼虫 Nothing in the gallery	未知 Unknown
3 – 4 龄幼虫 3rd – 4th instar larva	树表面可见啄痕，对应树皮下有虫道，但是没有幼虫 Pecks visible on tree surface, no EAB larva in the gallery under peck	啄木鸟[1] Woodpeckers
	幼虫体表布满白色小幼虫或茧(图 1：B) The body of the EAB larva covered with larvae or pupae of parasitoid (Fig. 1：B)	白蜡吉丁柄腹茧蜂 *S. agrili*
	虫道末端布满白蜡小幼虫，且两端可见寄主幼虫头壳和尾叉(图 1：C) The end of gallery filled with parasitoid larvae, with host head capsule and furca left in the gallery (Fig. 1：C)	白蜡吉丁啮小蜂 *Tetrastichus planipennisi* Yang
	幼虫虫体为黑色，腐烂，或虫体僵硬，体表布满白色短毛 The cuticle of EAB larva black, larval body decaying, or stark, a lot of hypha covered on the host surface	病原微生物 Pathogenic microorganisms
	虫道末端幼虫被植物的增生组织挤死(图 1：E) Larva died, plant protection tissue practically filled in the gallery (Fig. 1：E)	植物抗性 Plant resistance
	虫道末端有一白色裸蛹，未见寄主幼虫(图 1：F) No EAB larva but a naked pupa in the gallery (Fig. 1：F)	扁胫旋小蜂 *Metapelma* sp.
	虫道末端有一暗黄色茧，未见寄主幼虫(图 1：G) No EAB larva but a dark yellow cocoon in the gallery (Fig. 1：G)	刻柄茧蜂 *Atanycolus* sp.
	虫道末端有蚂蚁等正在取食幼虫(图 1：J) EAB larva was preyed by ants in the gallery (Fig. 1：J)	捕食 Predation
	虫道末端未见幼虫 No EAB larva in the gallery	未知 Unknown

续表 1 Table 1 contiuned

发育阶段 Developmental stage	死亡症状 Death syndromes	致死因子 Lethal factors
蛹 Pupa	蛹室内未见蛹，充满黑色虫粪 No EAB pupa but frass in the gallery	捕食 Predation
	树皮表面可见琢痕，对应树皮下蛹室内没有蛹 Pecks visible on tree surface, no EAB pupa in the gallery under peck	啄木鸟 Woodpeckers
	蛹室内有一白色小幼虫，未见蛹(图 1: I) No pupa but a small white larva in the host pupa chamber (Fig. 1: I)	未知天敌 Unknown parasitoid
	蛹室内布满黄色幼虫，头部为褐色，未见蛹(图 1: H) No pupa in the host chamber, filled with yellow larvae, its head brown (Fig. 1: H)	未知天敌 Unknown parasitoid
	蛹室空，未见蛹 No EAB pupa in the host pupa chamber	未知 Unknown

[1]捕食白蜡窄吉丁幼虫或蛹的啄木鸟共有 5 种：大斑啄木鸟 *Dendrocopos major*，灰头绿啄木鸟 *Picus canus*，绒啄木鸟 *Picoides pubescens*，长嘴啄木鸟 *Picoides villosus* 和红腹啄木鸟 *Melanerpes carolinus*(路纪芳等，2012a)；下表同。There are five species of woodpeckers preying on larva or pupa of *Agrilus planiennis*: *Dendrocopos major*, *Picus canus*, *Picoides pubescens*, *Picoides villosus* and *Melanerpes carolinus* (Lu *et al*., 2012a). The same for the following tables.

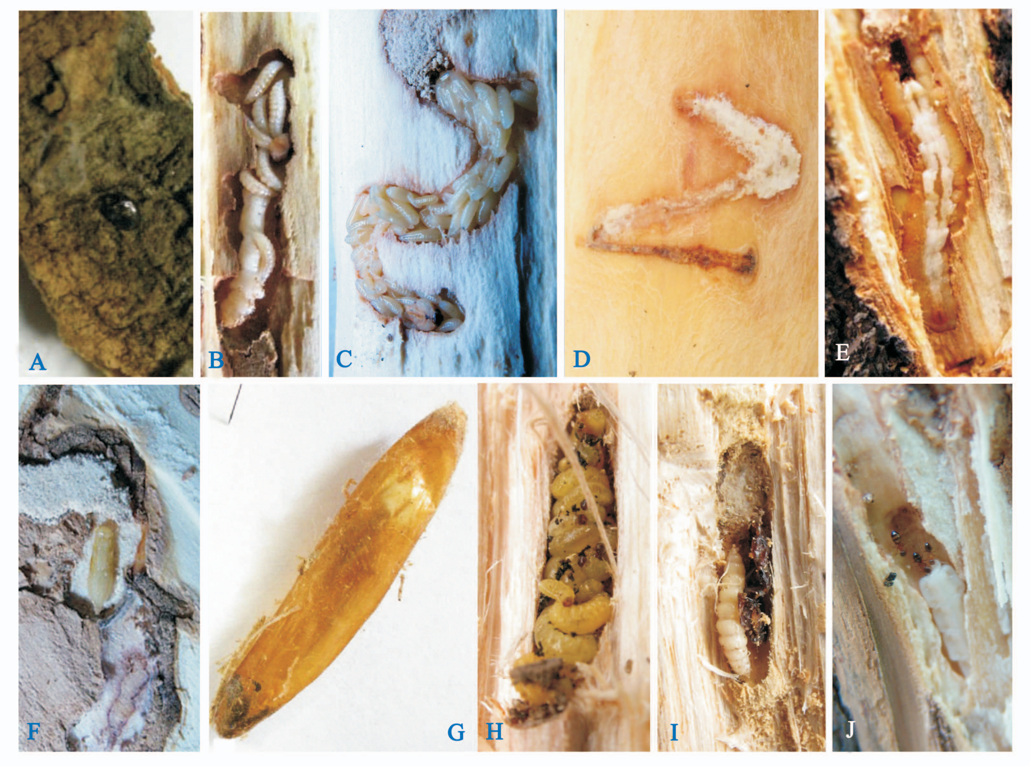


图 1 白蜡窄吉丁的死亡症状和致死因子

Fig. 1 Death syndrome and lethal factors of *Agrilus planipennis*

A：被白蜡吉丁卵跳小蜂寄生的卵粒 Parasitized eggs by *Oobius agrili* Zhang *et* Huang；B：白蜡吉丁柄腹茧蜂幼虫 *Spathius agrili* larvae；C：白蜡吉丁啮小蜂幼虫 *Tetrastichus planipennisi* larvae；D：1－2 龄白蜡窄吉丁幼虫为害时水曲柳的抗性 *Fraxinus mandshurica* resistance to the 1st－2nd instar larvae of *A. planipennis*；E：3－4 龄白蜡窄吉丁幼虫为害时绒毛白蜡的抗性 *Fraxinus velutina* resistance to the 3rd－4th instar larvae of *A. planipennis*；F：扁胫旋小蜂蛹 Cocoon of *Metapelma* sp.；G：刻柄茧蜂茧 Cocoon of *Atanycolus* sp.；H，I：未知天敌 Unknown parasitoid；J：被蚂蚁捕食的幼虫 Larvae preyed by ants.

61.95%（843.51/1 361.51）、61.58%（882.40/1 432.95），其中白蜡吉丁柄腹茧蜂的寄生作用和啄木鸟的捕食作用最明显。而辽宁地区，卵期死亡率为69.77%，是种群数量损失最高的阶段，其中寄生性天敌白蜡吉丁卵跳小蜂为最主要的致死因子。由此可知，影响天津和北京2个地区种群数量变动最主要的阶段是3－4龄幼虫期，辽宁地区最重要的影响时期则是卵期。

另外，从表2～4中还可以看出，北京地区天敌的种类最丰富，但是种群死亡率却最低，说明该地区害虫的种群密度过大，天敌的作用不能控制其种群数量的增长。

表2　天津地区白蜡窄吉丁自然种群生命表

Table 2　Natural life table of *Agrilus planipennis* in Tianjin

发育阶段 Developmental stage *x*	各虫期的起始数 Initial number *lx*	引起死亡的因子 Lethal factors *dxF*	死亡数 Death number *dx*	死亡率 Mortality 100*qx*	存活率(%) Survival rate *sx*
卵 Egg	2 000.00	捕食 Predation	232.26	11.61	88.39
		未知 Unknown	393.55	19.67	80.37
			625.81	31.29	68.71
1－2龄幼虫 1st－2nd instar larva	1 374.19	植物抗性 Plant resistance	9.87	0.72	99.28
		白蜡吉丁柄腹茧蜂 *Spathius agrili*	1.41	0.10	99.90
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	1.41	0.10	99.90
			12.68	0.92	99.08
3－4龄幼虫 3rd－4th instar larva	1 361.51	植物抗性 Plant resistance	28.31	2.08	97.92
		白蜡吉丁柄腹茧蜂 *S. agrili*	475.54	34.93	65.07
		扁胫旋小蜂 *Metapelma* sp.	1.42	0.10	99.90
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	159.93	11.75	88.25
		啄木鸟 Woodpeckers	123.13	9.04	90.96
		未知捕食 Unknown predation	55.20	4.05	95.95
			843.51	61.95	38.05
蛹 Pupa	518.00	捕食 Predation	8.03	1.55	98.45
		未知 Unknown	4.02	0.78	99.22
			12.05	2.33	97.67
成虫 Adult	505.95				
全代 Whole generation			1 494.05	74.70	25.30

由表中的数据和公式4可算得天津地区种群趋势指数 $I=0.6871\times0.9908\times0.38054\times0.9767\times0.50\times150\times98.33\div150=12.4388$，其中，150为寄主树种为绒毛白蜡时雌虫最高产卵量，98.33为雌虫的实际平均产卵量(路纪芳等，2012b)，98.33÷150为卵的实际产出率。已知白蜡窄吉丁自然种群的成虫性比为1∶1（Wang *et al*., 2010），因此雌虫的比例 $P_♀$ 为0.5。Index of population trend of *A. planipennis* in Tianjin was calculated through data of table and formula 4：$I=0.6871\times0.9908\times0.38054\times0.9767\times0.50\times150\times98.33\div150=12.4388$. The highest oviposition amount and average real oviposition amount of female *A. planipennis* was 150 and 98.33 when the host tree was *F. velutina*, respectively (Lu *et al*., 2012b); the real eggs output was 98.33÷150. The sex ratio of emerald ash borer natural population was 1∶1 (Wang *et al*., 2010), so the proportion of females $P_♀$ was 0.5.

表 3 北京地区白蜡窄吉丁自然种群生命表

Table 3 Natural life table of *Agrilus planipennis* in Beijing

发育阶段 Developmental stage *x*	各虫期的起始数 Initial number *lx*	引起死亡的因子 Lethal factors *dxF*	死亡数 Death number *dx*	死亡率 Mortality 100*qx*	存活率(%) Survival rate *sx*
卵 Egg	2 000.00	白蜡吉丁卵跳小蜂 *Oobius agrili*	70.97	3.55	96.45
		捕食 Predation	180.65	9.03	90.97
		未知 Unknown	296.77	14.84	85.16
			548.39	27.42	72.58
1-2 龄幼虫 1st-2nd instar larva	1 451.61	植物抗性 Plant resistance	7.46	0.51	99.49
		未知 Unknown	11.19	0.77	99.23
			18.66	1.29	98.71
3-4 龄幼虫 3rd-4th instar larva	1 432.95	白蜡吉丁柄腹茧蜂 *Spathius agrili*	263.97	18.42	81.58
		白蜡吉丁啮小蜂 *Tetrastichus planipennisi*	33.94	2.37	97.63
		刻柄茧蜂 *Atanycolus* sp.	45.25	3.16	96.84
		扁胫旋小蜂 *Metapelma* sp.	7.54	0.53	99.47
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	52.79	3.68	96.32
		啄木鸟 Woodpeckers	429.89	30.00	70.00
		未知 Unknown	49.02	3.42	96.58
			882.40	61.58	38.42
蛹 Pupa	550.56	寄蝇 Tachinid	4.34	0.79	99.21
		啄木鸟 Woodpeckers	8.67	1.57	98.43
		未知 Unknown	8.67	1.57	98.43
			21.68	3.94	96.06
成虫 Adult	528.88				
全代 Whole generation			1 471.12	73.56	26.44

北京地区的寄主树种与天津地区基本相同，均为北美栽培品种绒毛白蜡，雌虫的最高产卵量和平均产卵量与天津地区相同，因此该地区的种群趋势指数 $I = 0.7258 \times 0.9871 \times 0.3842 \times 0.9606 \times 0.50 \times 150 \times 98.33 \div 150 = 12.9997$。Host tree of *A. planipennis* in Beijing was the same as that in Tianjin, both were North American cultivated varieties. The highest oviposition amount and average real oviposition amount of female *A. planipennis* in Beijing were the same as those in Tianjin. So the index of population trend in this region $I = 0.7258 \times 0.9871 \times 0.3842 \times 0.9606 \times 0.50 \times 150 \times 98.33 \div 150 = 12.9997$.

2.3 影响白蜡窄吉丁自然种群数量变动的主要因素分析

2.3.1 天津地区白蜡窄吉丁种群趋势指数及排除控制指数：种群数量的排除控制指数是重要因子分析的基础。表 5 给出了天津地区白蜡窄吉丁自然种群数量的排除控制指数。在所有致死因子中，白蜡吉丁柄腹茧蜂的作用最大，该因子的排除控制指数为 1.5382 (1.0010 × 1.5367)，如果没有该天敌的寄生作用，该地区的种群趋势指数将为原来的 1.5382倍。假设全部致死因子的排除控制指数为 $EIPC_{all}$，则：

$$EIPC_{all} = (1.1314)(1.2442)(1.0072)\cdots\cdots(1.0078) = 2.9661$$。

表 4　辽宁地区白蜡窄吉丁自然种群生命表

Table 4　Natural life table of *Agrilus planipennis* in Liaoning

发育阶段 Developmental stage x	各虫期的起始数 Initial number lx	引起死亡的因子 Lethal factors dxF	死亡数 Death number dx	死亡率 Mortality $100qx$	存活率(%) Survival rate sx
卵 Egg	2 000.00	白蜡吉丁卵跳小蜂 *Oobius agrili*	639.53	31.98	68.02
		捕食 Predation	302.33	15.12	84.88
		未知 Unknown	453.49	22.67	77.33
			1 395.35	69.77	30.23
1－2 龄幼虫 1st－2nd instar larva	604.65	植物抗性 Plant resistance	171.04	28.29	71.71
		白蜡吉丁啮小蜂 *Tetrastichus planipennisi*	4.50	0.74	99.26
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	28.51	4.71	95.29
		未知 Unknown	6.00	0.99	99.01
			210.05	34.74	65.26
3－4 龄幼虫 3rd－4th instar larva	146.22	植物抗性 Plant resistance	2.33	0.59	99.41
		白蜡吉丁啮小蜂 *T. planipennisi*	72.38	18.34	81.66
		未知寄生蜂 Unknown parasitoid	28.02	7.10	92.90
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	84.06	21.30	78.70
		啄木鸟 Woodpeckers	2.33	0.59	99.41
		未知 Unknown	11.67	2.96	97.04
			200.80	50.89	49.11
蛹 Pupa	86.74	未知天敌 Unknown natural enemy	3.73	1.92	98.08
			3.73	1.92	98.08
成虫 Adult	72.29				
全代 Whole generation			1 809.93	90.50	9.50

辽宁地区的寄主树种为我国本土白蜡树种水曲柳，雌虫最高产卵量为 90 粒，平均产卵量为 76.60(刘义果，1966)，卵的实际产出率为 76.60 ÷90，因此其种群趋势指数 $I=0.3023\times0.6526\times0.4911\times0.9808\times0.50\times90\times76.60\div90=3.6394$。Host tree of *A. planipennis* in Liaoning was native tree，*F. mandshurica*. The highest oviposition amount and average real oviposition amount was 90 and 76.60，respectively (Liu，1966). The real eggs output was 76.60 ÷90. So the index of population trend $I=0.3023\times0.6526\times0.4911\times0.9808\times0.50\times90\times76.60\div90=3.6394$.

2.3.2　北京地区白蜡窄吉丁自然种群趋势指数：表 6 给出了北京地区白蜡窄吉丁自然种群数量的排除控制指数。在所有的致死因子中，啄木鸟和白蜡吉丁柄腹茧蜂的作用最大，其排除控制指数分别为 1.4515 (1.4286×1.0160) 和 1.2258，如果没有它们的控制作用，该地区的种群趋势指数将为原来的 1.8462倍。设全部致死因子的排除控制指数为 $EIPC'_{all}$，则：

$EIPC'_{all}=(1.0368)(1.0993)(1.1743)\cdots\cdots(1.0160)(1.0160)=2.8236$。

2.3.3　辽宁地区白蜡窄吉丁自然种群趋势指数：表 7 给出了辽宁地区种群排除控制指数。在所有致死因子中，白蜡吉丁卵跳小蜂的寄生作用最大，其控制指数为 1.4701，如果该天敌的寄生作用，种群趋势指数将为原来的 1.4701 倍。设全部致死因子的排除控制指数为 $EIPC''_{all}$，则：

$EIPC''_{all}=(1.4702)(1.1781)\cdots\cdots(1.1132)(1.2000)=5.9408$。

表 5 天津地区白蜡窄吉丁自然种群排除控制指数

Table 5 *EIPC* of *Agrilus planipennis* in Tianjin

发育阶段 Developmantal stage *x*	各虫期的起始数 Initial number *lx*	引起死亡的因子 Lethal factors *dxF*	存活率(%) Survival rate *sx*	*EIPC*
卵	2 000.00	捕食 Predation	88.39	1.1314
Egg		未知 Unknown	80.37	1.2442
1－2 龄幼虫	1 374.19	植物抗性 Plant resistance	99.28	1.0072
1s－2nd instar larva		白蜡吉丁柄腹茧蜂 *Spathius agrili*	99.90	1.0010
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	99.90	1.0010
3－4 龄幼虫	1 361.51	植物抗性 Plant resistance	97.92	1.0212
3rd－4th instar larva		白蜡吉丁柄腹茧蜂 *S. agrili*	65.07	1.5367
		扁胫旋小蜂 *Metapelma* sp.	99.90	1.0010
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	88.25	1.1331
		啄木鸟 Woodpeckers	90.96	1.0994
		未知 Unknown	95.95	1.0423
蛹	518.00	捕食 Predation	98.45	1.0157
Pupa		病原微生物 Pathogenic microorganisms	99.22	1.0078

EIPC：排除控制指数 Exclusion index of population control. 表 6 和 7 同。The same for Tables 6 and 7.

表 6 北京地区白蜡窄吉丁自然种群排除控制指数

Table 6 The exclusion index of population control (*EIPC*) of *Agrilus planipennis* in Beijing

发育阶段 Developmantal stage *x*	各虫期的起始数 Initial number *lx*	引起死亡的因子 Lethal factors *dxF*	存活率(%) Survival rate *sx*	*EIPC*
卵	2 000.00	白蜡吉丁卵跳小蜂 *Oobius agrili*	96.45	1.0368
Egg		捕食 Predation	90.97	1.0993
		未知 Unknown	85.16	1.1742
1－2 龄幼虫	1 451.60	植物抗性 Plant resistance	99.49	1.0052
1st－2nd instar larva		未知 Unknown	99.23	1.0078
3－4 龄幼虫	480.34	白蜡吉丁柄腹茧蜂 *Spathius agrili*	81.58	1.2258
3rd－4th instar larva		白蜡吉丁啮小蜂 *Tetrastichus planipennisi*	97.63	1.0243
		扁胫旋小蜂 *Metapelma* sp.	96.84	1.0326
		刻柄茧蜂 *Atanycolus* sp.	99.47	1.0053
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	96.32	1.0383
		啄木鸟 Woodpeckers	70.00	1.4286
		未知 Unknown	96.58	1.0354
蛹	465.35	寄蝇 Tachinid	99.21	1.0079
Pupa		啄木鸟 Woodpeckers	98.43	1.0160
		未知 Unknown	98.43	1.0160

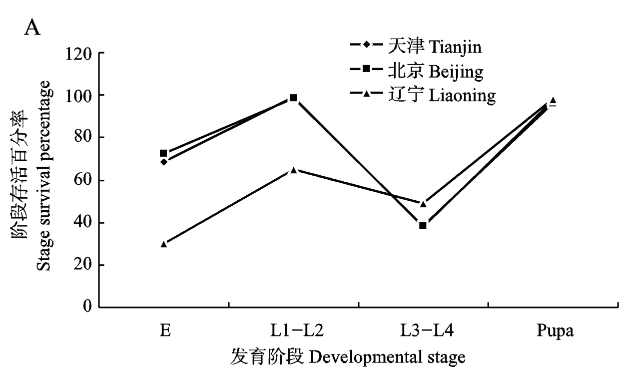
表 7　辽宁地区白蜡窄吉丁自然种群控制指数

Table 7　The exclusion index of population control (*EIPC*) of *Agrilus planipennis* in Liaoning

发育阶段 Developmantal stage *x*	各虫期的起始数 Initial number *lx*	引起死亡的因子 Lethal factors *dxF*	存活率(%) Survival rate *sx*	*EIPC*
卵期 Egg stage	2 000.00	白蜡吉丁卵跳小蜂 *Oobius agrili*	68.02	1.4701
		捕食 Predation	84.88	1.1781
		未知 Unknown	77.33	1.2932
1 -2 龄幼虫 1st -2nd instar larva	604.65	植物抗性 Plant resistance	71.71	1.3945
		白蜡吉丁啮小蜂 *Tetrastichus planipennisi*	99.26	1.0075
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	95.29	1.0495
		未知 Unknown	99.01	1.0100
3 -4 龄幼虫 3rd -4th instar larva	146.22	植物抗性 Plant resistance	99.41	1.0060
		白蜡吉丁啮小蜂 *T. planipennisi*	81.66	1.2246
		病原微生物 Pathogenic microorganisms	92.90	1.0764
		啄木鸟 Woodpeckers	78.70	1.2707
		未知寄生 Unknown parasitoid	99.41	1.0060
		未知 Unknown	97.04	1.0305
蛹 Pupa	86.74	未知天敌 Unknown natural enemy	98.08	1.0196

2.4　白蜡窄吉丁的存活百分率曲线

昆虫的阶段存活率决定了其自然种群的发展。图 2 为天津、北京和辽宁 3 个地区由卵期到蛹期的存活百分率曲线。从左侧图中可以看出，天津和北京 2 个地区种群的发展趋势一致，而辽宁地区种群的发展与它们不相同。天津和北京两个地区 1 -2 龄幼虫期和蛹期的存活率极高，接近 100%，而 3 -4 龄幼虫期的存活率骤降，且天津地区的下降速度快于北京。而辽宁地区种群存活率的发展接近于线性，由卵期到 3 -4 龄幼虫期和蛹期存活率逐渐增大，1 -2 龄幼虫期的存活率稍高于卵期和 3 -4 龄幼虫期。因此，3 -4 龄的幼虫阶段是抑制天津和北京 2 个地区白蜡窄吉丁种群数量增长的关键阶段，而影响辽宁地区种群增长的关键阶段则是卵期。右侧为白蜡窄吉丁的累积存活百分率曲线，由图可知北京和天津地区白蜡窄吉丁的存活率远大于辽宁地区。



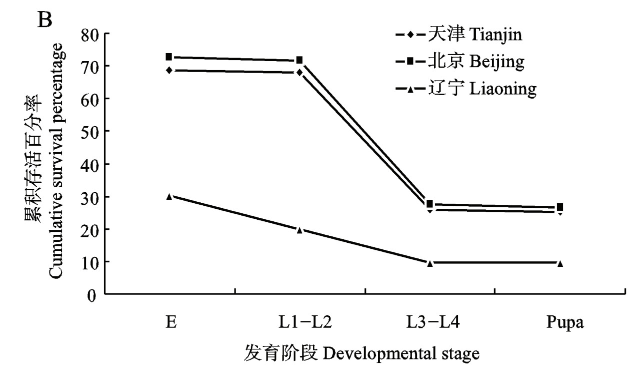


图 2　白蜡窄吉丁的存活百分率

Fig. 2　Survival percentage curve of *Agrilus planipennis*

E：卵 Egg；L1 -L2：1 -2 龄幼虫 1st -2nd instar larva；L3 -L4：3 -4 龄幼虫 3rd -4th instar larva；P：蛹 Pupa.

3 讨论

本研究采用种群存活率和种群趋势指数(I)来分析生命表，求得 I 值以供短期预测。由求得的 I 值可知，天津、北京和辽宁 3 个地区白蜡窄吉丁自然种群密度在接下来的 1～2 年均会增加，北京地区的增长速度最快($I_{北京}=12.9997$)，其次是天津地区($I_{天津}=12.4388$)，而辽宁地区的种群增长速度缓慢($I_{辽宁}=3.6394$)。本研究测得的 3 个地区的种群趋势指数高于实际情况，可能造成数值偏高的原因有 3 个：试验仅调查了有白蜡窄吉丁危害的白蜡林，而不能代表当地的平均水平；试验中卵期捕食率偏低；白蜡窄吉丁成虫期的死亡率缺失。

本研究采用种群排除控制指数 *EPIC* 来剖析 3 个调查地区的种群趋势指数 I。辽宁地区的种群排除控制指数($EPIC''_{all}=5.9408$)大于天津($EPIC_{all}=2.9393$)和北京地区($EPIC'_{all}=2.8236$)，说明辽宁地区自然因子的控制作用较强。另外，在所有致死因子中，除辽宁地区白蜡吉丁卵跳小蜂的寄生作用外，寄主树种抗性的排除控制指数最大，为 1.4029 (1.3945×1.0060)，是导致 3 个调查地区种群数量变动的重要的因素，这与 Duan 等(2012)在林间调查的结论相同。因此，生产上应采用栽培中国本土抗虫树种，或选育抗虫树种来降低该虫的种群数量。除此之外，天敌的寄生作用对种群数量的影响作用也比较大，天津地区的主要天敌为白蜡吉丁柄腹茧蜂，其贡献率为 31.92% (476.95/1 494.05)，北京地区主要天敌是啄木鸟，其贡献率为 29.81% (438.56/1 471.12)，而辽宁地区的主要天敌为卵期寄生蜂白蜡吉丁卵跳小蜂，其贡献率为 35.33% (639.53/1 809.93)。由此可知，在生产中也可以通过大量繁育优势种天敌来防治该虫的危害。除此之外，啄木鸟和病原菌的致死作用也比较重要。

一份完整的生命表应包含昆虫整个世代的所有信息。白蜡窄吉丁成虫把卵产在树皮裂缝中，表面难以发现，因此，卵期捕食率的调查是生命表组建中的一个难点。作者在调查时采用标记回收的方法在林间调查卵的捕食率，调查得到的捕食率为 72.44% (92/127)，远远大于理论值。造成这个结果的原因可能是使用解剖刀在寄主树种上划缝隙时降低了卵的隐蔽性，而且划口处会有树汁液流出，这会招引蚂蚁等捕食性动物取食。因此，生命表中以调查得到的卵期捕食率为准，但这个数值低于实际值。另外，白蜡窄吉丁成虫羽化出孔后常在气温较高的晴天活跃在强光下的树冠层叶面上，不停地展翅、飞舞，作短距离飞行，给成虫期的调查带来了巨大的困难。本研究采用特定时间砍伐进行调查，这种方法可以得到卵期、幼虫期和蛹期的致死原因，但是不能得到成虫期的死亡原因。因此，生命表中的成虫迁飞率、捕食率、病原菌感染率等尚须进一步研究。

参考文献 (References)

Baranchikov Y, Mozolevskaya E, Yurchenko G, Kenis M, 2008. Occurrence of the emerald borer ash, *Agrilus planipennis* in Russia and its potential impact on European forestry. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 38(2): 233－238.

Chen XM, Wang ZL, Chen Y, Zhao JJ, Ye SD, Wang SY, 2008. Age-specific life table of Chinese white wax scale (*Ericerus pela*) natural population and analysis of death key factors. *Scientia Silvae Sinicae*, 44(9): 87－94. [陈晓鸣, 王自力, 陈勇, 赵杰军, 叶寿德, 王绍云, 2008. 白蜡虫自然种群年龄特征生命表及主要死亡因素分析. 林业科学, 44(9): 87－94]

Duan JJ, Bauer LS, Hansen JA, Abell KJ, Driesche R, 2012. An improved method for monitoring parasitism and establishment of *Oobius agrili* (Hymenoptera: Encyrtidae), an egg parasitoid introduced for biological control of the emerald ash borer (Coleoptera: Buprestidae) in North America. *Biological Control*, 60(3): 255－261.

Haack RA, Jendek E, Liu HP, Marchant KR, Petrice TR, Poland TM, Ye H, 2002. The emerald ash borer: a new exotic pest in North America. *Newsletter of the Michigan Entomological Society*, 47(3/4): 1－5.

Liu HP, Bauer LS, Gao RT, Zhao TH, Petrice TR, Haack RA, 2003. Exploratory survey for the emerald ash borer, *Agrilius planipennis* (Coleoptera: Buprestidae), and its natural enemies in China. *The Great Lakes Entomologist*, 36(3/4): 191－204.

Lu JF, Wang XY, Yang ZQ, 2012a. Research progress on the emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(3): 673－680. [路纪芳, 王小艺, 杨忠岐, 2012a. 中国白蜡窄吉丁研究进展. 应用昆虫学报, 49(3): 673－680]

Lu JF, Wang XY, Yang ZQ, Liu ES, Bao JM, Wang JP, Liu YC, Zhang XW, 2012b. Influence of separate rearing on adult longevity and fecundity of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis* Fairmaire (Coleoptera: Buprestidae). *Acta Entomologica Sinica*, 55(3): 330－335. [路纪芳, 王小艺, 杨忠岐, 刘恩山, 包金梅, 王俊苹, 刘云成, 张显文, 2012b. 隔离饲养对白蜡窄吉丁成虫寿命和繁殖力的影响. 昆虫学报, 55(3): 330－335]

Nanjing Agricultural College, 1985. Insect Ecology and Forecast. Agriculture Press, Beijing. [南京农学院, 1985. 昆虫生态及预测预报. 北京: 农业出版社]

Pang XF, 1990. Population control index and its application. *Plant*

Protection, 17(1): 11 – 16. [庞雄飞, 1990. 种群数量控制指数及其应用. 植物保护, 17(1): 11 – 16]

Pang XF, 2002. Ecological Control of Pest Population – Research Methods for Controlling Population Natal and Mortal Processes. Higher Education Press, Beijing. 30 – 37. [庞雄飞, 2002. 害虫种群的生态控制——种群生灭过程控制研究方法. 北京: 高等教育出版社. 30 – 37]

Wang XY, Yang ZQ, 2008. Behavioral mechanisms of parasitic wasps for searching concealed insect hosts. *Acta Ecologica Sinica*, 28(3): 1257 – 1269. [王小艺,杨忠岐, 2008. 寄生蜂寻找隐蔽性寄主害虫的行为机制. 生态学报, 28(3): 1257 – 1269]

Wang XY, Yang ZQ, Gould JR, Zhang YN, Liu GJ, Liu ES, 2010. The biology and ecology of the emerald ash borer, *Agrilus planipennis*, in China. *Journal of Insect Science*, 128(10): 1 – 23.

You MS, 1997. The development and use of life tables in the study of insect populations. *Wuyi Science Journal*, 13: 165 – 175.

Yu CM, 1992. *Agrilus marcopoli* Obenberger. In: Xiao GR ed. Forest Insects of China. 2nd ed. China Forestry Publishing House, Beijing. 400 – 401. [于诚铭, 1992. 花曲柳窄吉丁. 见: 萧刚柔主编. 中国森林昆虫(第2版). 北京: 中国林业出版社. 400 – 401]

Zhang XX, 2002. Insect Ecology and Forecast. 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. [张孝羲, 2002. 昆虫生态及预测预报(第3版). 北京: 中国农业出版社]

Zhao HQ, Wang XY, Yang ZQ, Zhong Y, He DM, 2006. Quarantine pest – emerald ash borer, *Agrilus planipennis*. *Plant Quarantine*, 20(2): 89 – 91. [赵汗青, 王小艺, 杨忠岐, 种焱, 何德敏, 2006. 检疫害虫——白蜡窄吉丁. 植物检疫, 20(2): 89 – 91]

(责任编辑: 袁德成)